

APLICACIÓN DEL CÓDIGO HYDRUS 2D/3D PARA EL ESTUDIO DE LA HIDRODINÁMICA DE LA ZNS, EN EL ÁMBITO INDUSTRIAL DE LA CIUDAD DE BAHÍA BLANCA, ARGENTINA.

Scherger, Leonardo^{1 2}

¹*Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (CGAMA). Comisión de Investigaciones Científicas (Pcia. de Buenos Aires).*

²*Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur (UNS), San Juan 670, B8000ICN, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.*

Teléfono +54 0291 4595101 int. 3015

Mail de contacto: leonardo.scherger@uns.edu.ar

Resumen

A partir de datos hidrodinámicos existentes de la zona no saturada recolectados en una parcela experimental, situada en el ámbito industrial de la ciudad de Bahía Blanca, se aplicó el código Hydrus 2D/3D con el objeto de realizar una práctica metodológica que permita generar un conocimiento basal que será destinado a los estudios venideros en dicho sector. Mediante datos texturales y registros de humedad volumétrica y potencial hidrodinámico, se determinaron los parámetros hidráulicos a utilizarse durante la simulación para un año hidrológico calendario. La metodología aplicada permitió reconocer los procesos reinantes para cada intervalo de la sección, principalmente la relación entre periodos lluviosos y periodos secos, el predominio de flujos verticales ascendentes o descendentes y la relación entre el contenido de humedad del suelo y el control que ejerce la posición de la capa freática. Conocer las características hidrodinámicas del medio permitirá obtener un punto de partida para estudios futuros a realizarse en el mismo dominio, especialmente el transporte de sustancias potencialmente contaminantes, y el control que ejerce la ZNS sobre los mismos.

Introducción

El estudio de la hidrodinámica de la zona no saturada compone una herramienta esencial para la protección del recurso hídrico subterráneo y materiales del suelo. Conocer las cualidades hidrodinámicas del terreno permite dilucidar las condiciones de humedad y potencial de presión, que regulan el movimiento del agua, siendo fundamental para predecir el movimiento de las sustancias transportadas en la solución del suelo. Las áreas industriales son zonas susceptibles a generar contaminación del recurso, especialmente por la pérdida de ductos, piletas, tanques, etc., que generan condiciones de carga hidráulica positiva, siendo modificada la hidrodinámica natural del medio. En este contexto pueden generarse condiciones de saturación parcial impuestas por factores externos, que aceleran la migración de solutos desde la ZNS al acuífero freático.

Este estudio tiene como objetivo aplicar el código Hydrus 2D/3D (Simunek *et al.*, 2006) en la simulación de la hidrodinámica de la ZNS, en sus condiciones naturales durante

un año hidrológico calendario. Esta tarea inicial dentro del marco de estudio de la movilidad de sustancias contaminantes en el área industrial de la Ciudad de Bahía Blanca, se propone validar la metodología de simulación en base a datos de campo del año 2006, registrados por Lafont (2009), con vista a obtener valores de referencia para los parámetros hidrodinámicos de terreno a utilizar en futuros estudios en la zona.

Características generales del área de estudio

El área de estudio (Fig.1) se ubica dentro del polo petroquímico-industrial de la ciudad de Bahía Blanca, en el ámbito estuarial costero, a 8 Km. al sur de la Ciudad de Bahía Blanca limitando al noroeste y sureste con la ciudad de Ingeniero White y al oeste y sur con el estuario de Bahía Blanca. El clima de la ciudad de Bahía Blanca es templado, con valores medios de temperatura comprendidos entre 14 °C y 20 °C y estaciones térmicas bien diferenciadas (Capelli de Steffens y Campo de Ferraras, 2004). Las precipitaciones medias para el período de 1908 – 2008 en el suroeste bonaerense se estimaron en 584 mm (Campo *et al.*, 2009). Los máximos valores de precipitación se manifiestan en primavera y en otoño y los mínimos en invierno (Campo de Ferreras *et al.*, 2004a). Carrica y Lexow (2006) estiman valores de ETP de 1170mm y ETR de 401mm para el periodo 2003-2006.

Geomorfológicamente, el área comprende una plataforma de abrasión marina labrada sobre sedimentos Plio-pleistocénicos por ingresiones marinas holocenas. Sobre la misma se depositan sedimentos de origen marino, asociados a rellenos de marea. Las áreas que denotan condiciones naturales se presentan como relictos restringidos, ya que la mayor parte del área se encuentra modificada antropicamente. La geología fue descrita por Fidalgo (1983), quien denominó Sedimentos Pampeanos (Fidalgo *et al.* 1975), a limos loessicos de edad Pliocena que subyacen a los depósitos marinos recientes de la Fm. Maldonado (Fidalgo, 1983). Esta última consiste en una facies

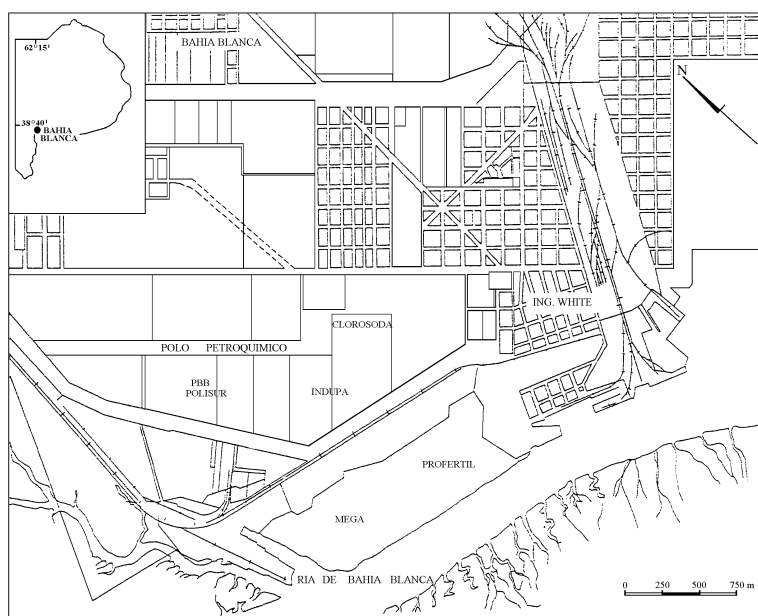


Figura 1: Área de estudio.

granodecreciente, con arenas oscuras en la base (con contenidos de fracción limo o limo arcilla menor al 35%) que pasan gradualmente a limos arenosos, limos arcillosos y arcillas limosas (carente o con contenidos muy pobres de arena). El relleno artificial de los suelos comprende material de relleno constituido por sedimentos pampeanos triturados y compactados artificialmente. Se observan niveles de 1 a 0,4 m de espesor (Lafont, 2009). Sobre este material se asientan las plantas industriales y las vías de comunicación. En el área circundante a los canales de navegación se adiciona material arenoso mediano a fino originado durante las tareas de dragado del estuario.

Materiales y Métodos

Parcela Experimental

Los estudios se realizan en base a datos adquiridos en una parcela experimental localizada dentro del predio de la empresa Profertil S.A. La misma fue implantada originalmente con el objeto de los estudios realizados por Lafont (2009) de identificación y caracterización de contaminantes metálicos en el acuífero freático. Inicialmente la parcela constaba del siguiente instrumental: dos juegos de tensiómetros (Soil Measurements System) ubicados a 30, 60, 90, 120, 150 y 180 cm de profundidad, dos tubos de hasta 2m de profundidad para el acceso de una sonda de neutrones a fin de determinar humedad, cápsulas de succión de acero inoxidable instaladas a 30, 60 y 90 cm de profundidad destinadas al muestreo de agua intersticial del suelo y un pozo exploratorio donde se registraban los niveles freáticos mediante un freatómetro digital de registro continuo. Esta misma locación fue reacondicionada en Junio del 2017 y será puesta en funcionamiento para estudios futuros.

Propiedades Hidráulicas

| Profundidad (cm) | % ARENA | % LIMO | % ARCILLA | Parámetros Iniciales | | | | |
|---------------------|------------|-----------|--------------|----------------------|------------|----------|--------|-------|
| | | | | θ_r | θ_s | α | n | K(h) |
| 30 | 41 | 56 | 3 | 0,032 | 0,4335 | 0,0071 | 1,6073 | 87,56 |
| 60 | 59 | 35 | 6 | 0,0336 | 0,3946 | 0,0235 | 1,4194 | 50,19 |
| 90 | 58 | 37 | 5 | 0,0319 | 0,3985 | 0,0223 | 1,4257 | 53,62 |
| 120 | 65 | 28 | 7 | 0,0357 | 0,3896 | 0,0316 | 1,4126 | 50,04 |
| 150 | 68 | 29 | 3 | 0,029 | 0,3983 | 0,0387 | 1,4382 | 73,05 |
| 180 | 67 | 25 | 8 | 0,038 | 0,3876 | 0,0335 | 1,4168 | 47,78 |
| 210 | 20 | 33 | 47 | 0,0945 | 0,4756 | 0,0154 | 1,3055 | 12,55 |

| Parámetros Ajustados | | | | |
|----------------------|------------|----------|------|-------|
| Profundidad (cm) | θ_s | α | n | R^2 |
| 30 | 0,371 | 0,008 | 1,47 | 0,87 |
| 60 | 0,43 | 0,066 | 1,29 | 0,72 |
| 90 | 0,36 | 0,18 | 1,08 | 0,94 |
| 120 | 0,19 | 0,009 | 4,75 | 0,96 |
| 150 | 0,33 | 0,019 | 3,03 | 0,92 |
| 180 | 0,43 | 0,3 | 1,05 | 0,94 |

El perfil analizado se subdividió en siete capas, en función de sus características texturales. A partir de los percentiles de las fracciones arena, limo y arcilla se determinó una predicción inicial de los parámetros hidráulicos θ_r , θ_s , α , n y $K(h)$ mediante la función de pedotransferencia Rosseta Lite (V1.1) (Tabla.1). Mediante el software RETC (V 6.02) (van Genuchten *et al.*, 1991) se prosiguió a ajustar las curvas de retención de humedad para cada material, en función de los datos de campo de humedad volumétrica y tensión matricial. El ajuste se realizó sobre los parámetros θ_s , α y n, considerando que son los principales coeficientes que regulan el flujo de agua para las condiciones de tensión registradas en campo. No se optimizaron los parámetros para profundidades mayores de 180cm, ya que no se cuentan registros de campo. Se consideraron únicamente los estimativos iniciales para el séptimo material en la simulación.

En la figura 2, se observan graficadas las curvas de retención de humedad para cada intervalo seleccionado, observándose un ajuste aceptable entre la curva graficada y los valores registrados en campo con coeficientes de determinación altos, siendo el

Tabla 1: Parámetros hidráulicos correspondientes para cada intervalo de muestreo.

material dos el que presenta la menor correlación con un R^2 de 0,72.

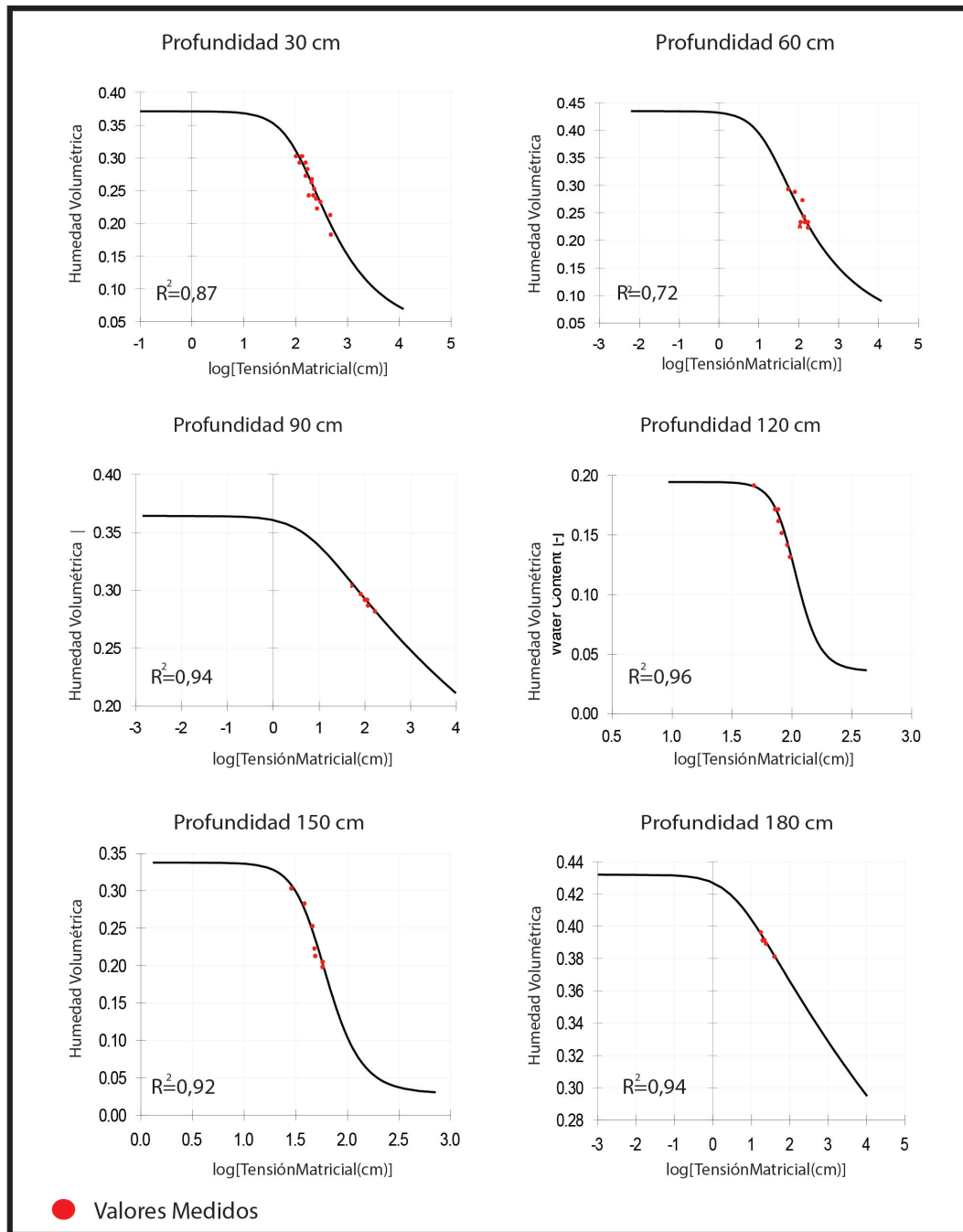


Figura 2: Curvas de retención de humedad graficadas mediante el software RETC, para cada intervalo seleccionado.

Modelo de simulación HYDRUS 2D/3D

El flujo de agua en la ZNS se simuló mediante la aplicación del código HYDRUS 2D/3D (Simunek *et al.*, 2006) que es ejecutable en ambiente Windows. Es un modelo de elementos finitos que resuelve numéricamente, en dos dimensiones, las ecuaciones de Richards para el flujo de agua en el medio no saturado - saturado y las ecuaciones de Fick (advección – dispersión) para el transporte de calor y solutos. La ecuación de flujo incluye un término sumidero que hace referencia a la extracción de agua por parte de las raíces de las plantas. Para la aplicación del método de

elementos finitos para resolver las ecuaciones de flujo y transporte se emplea el método Galerkin a partir de las condiciones iniciales y de contorno definidas por el usuario.

Elaboración del modelo

Se elaboró un dominio geométrico rectangular de 150 cm de ancho y 300 cm de altura. La malla de elementos finitos consistió en 1009 nodos y 1908 elementos triangulares distinguiéndose siete horizontes de 45, 30, 30, 30, 30, 30 y 195 cm de espesor respectivamente. Esta segmentación fue determinada con el objeto de que la simulación presente el mayor detalle posible ante las variaciones de los parámetros hidráulicos en los diferentes niveles.

El periodo de simulación consistió en 365 días, iniciando el 01/01/2006 y finalizando el 31/12/2006. La discretización del tiempo fue la siguiente: paso de tiempo inicial de 0,01 (día), paso mínimo 1e-003 (día) y máximo 1 (día)

El modelo hidráulico elegido para la simulación fue el propuesto por Van Genuththen-Mualem (Van Genuchten, 1980). El fenómeno de histéresis no fue considerado por motivos de simplificación, ya que no se cuentan con datos suficientes para diferenciar las ramas de humedecimiento y desecación en la curva de retención de humedad.

$$Se = 1 + [(ah)^n]^m$$

Donde $Se = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ es la humedad efectiva, $\alpha = h_a^{-1}$ es un parámetro empírico determinado por la inversa del valor de entrada de aire, h corresponde a la tensión matricial y n y m , son parámetros empíricos siendo $m = 1 - 1/n$. La conductividad hidráulica se estima mediante la ecuación:

$$K(Se) = K_s Se^l \left[1 - (1 - Se^{\frac{1}{m}})^m \right]^2$$

Donde K_s corresponde a la conductividad hidráulica saturada y l es la conductividad de poro para el cual se sugiere un valor de 0,5 por Mualem (1976) tras numerosos ensayos en varios suelos.

Condiciones Iniciales y de Borde

Las condiciones iniciales fueron introducidas en términos de la presión matricial estimada en función de los datos promedio para la fecha inicial de simulación.

El límite superior de la sección, superficie del suelo, se consideró dependiente de las condiciones atmosféricas, dependiente del tiempo: la precipitación diaria, provista por las empresas del polo petroquímico-industrial, y la evapotranspiración potencial de referencia estimada por Carrica y Lexow (2006) (Fig. 3a).

Se introduce el termino de extracción de agua por raíces bajo el modelo de Feddes *et al.* (1978, en Simunek *et. al.* 2006), considerando una cubierta herbácea de profundidad de raíces somera, tal como se observó en campo.

Los límites laterales son nodos con ausencia de flujo, mientras que el límite inferior se considera como una superficie variable en el tiempo, dependiente de la presión matricial simulando la capa freática oscilante. Son introducidas las profundidades del nivel freático para los 365 días simulados, registrados en la parcela (Fig. 3b).

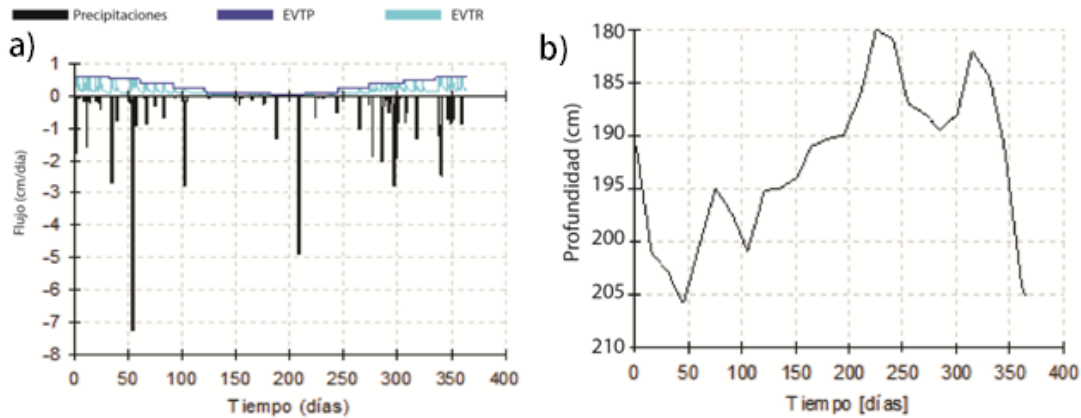


Figura 3: a) Pluviograma para el año 2006. Se indican los valores de EVTP y EVTR durante la simulación. b) Freatigrama indicando la profundidad del nivel freático para el año 2006, valores medidos en la parcela experimental (Lafont, 2009).

Validación del Método

Para la comprobación de la metodología se comparan las simulaciones obtenidas con los datos registrados en la parcela experimental para el año 2006, datos de humedad volumétrica y potencial de presión registrados los días 21/02/2006, 01/03/2006, 27/04/2006, 19/07/2006 y 27/09/2006 respectivamente. La validación se realiza mediante el cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_i)^2}{n}}$$

Resultados

Simulación con el modelo

La aplicación del código HYDRUS permitió la simulación de la hidrodinámica de la ZNS, lográndose reconocer los procesos hidrogeológicos predominantes a lo largo de un año hidrológico calendario. Fueron efectuadas diversas corridas del modelo, hasta alcanzar un nivel de ajuste aceptable con los valores medidos en campo. El nivel más superficial de la ZNS, representada por la zona de evapotranspiración es la capa

sujeta a cambios extremos dada su interacción con las condiciones climáticas reinantes.

Humedad Volumétrica

En la figura 4, se observa la simulación de los valores de humedad para el perfil a los 30, 60, 90, 120, 150 y 180 cm respectivamente. Puede observarse en general un buen ajuste de los valores simulados, obteniéndose un valor de RMSE de $0,015 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ (30cm), $0,012 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ (60cm), $0,006 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ (90cm), $0,023 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ (120cm), $0,005$ (150 cm) y $0,003 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ (180cm).

Para los niveles más superficiales los meses de enero y febrero muestran los menores contenidos de humedad en el suelo, periodo coincidente con las mayores tasas de evapotranspiración potencial para la zona. Aunque para el mes de diciembre las tasas de EVTP son similares, se observan niveles de humedad mayores debido principalmente a las precipitaciones de los meses de la primavera, que dejan como huella una humedad antecedente en el suelo. Para los 30cm de profundidad los picos de humedad que se registran a los 54, 102, 210 días son coincidentes con fechas de grandes precipitaciones (72, 27 y 49 mm respectivamente). Estos fenómenos podrían inferir eventos donde el flujo matricial es netamente gravitatorio, anulando los efectos de ascenso capilar en el perfil. Este fenómeno genera un rápido aumento de la humedad almacenada en el suelo hasta los 60 cm de profundidad. Lexow (2010) obtiene resultados similares donde atribuye las diferencias de humedad frente a un evento pluviométrico, al resultado de la entrada de agua por vías preferenciales, siendo la humectación del suelo mas rápida. Observaciones similares fueron realizadas por Carrica et al. (2008), quienes describen condiciones de buena permeabilidad para el material de relleno que tapiza el área, donde se ubican las plantas industriales. En estos materiales los autores calculan valores de recarga de hasta el doble que para los suelos naturales.

En los niveles más profundos del perfil el ajuste mejora, observándose que los valores de humedad simulados y medidos muestran tendencias muy similares. Los nodos de 90 y 120 cm de profundidad muestran variaciones de humedad volumétrica ($\pm 4 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) más acotadas que los nodos superiores ($\pm 15 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$), pudiendo correlacionarse con la zona intermedia de la ZNS. En esta zona generalmente se observa predominio de flujo matricial ascendente cuando predomina la EVT sobre las precipitaciones, siendo la humedad transferida desde esta zona hacia los niveles superiores. Por su parte, durante los meses lluviosos predomina el flujo gravitacional permitiendo que el agua prosiga la percolación y conforme recarga en tránsito. Este proceso que se observa con el incremento paulatino de la humedad a lo largo del perfil, que finaliza en los meses de la primavera.

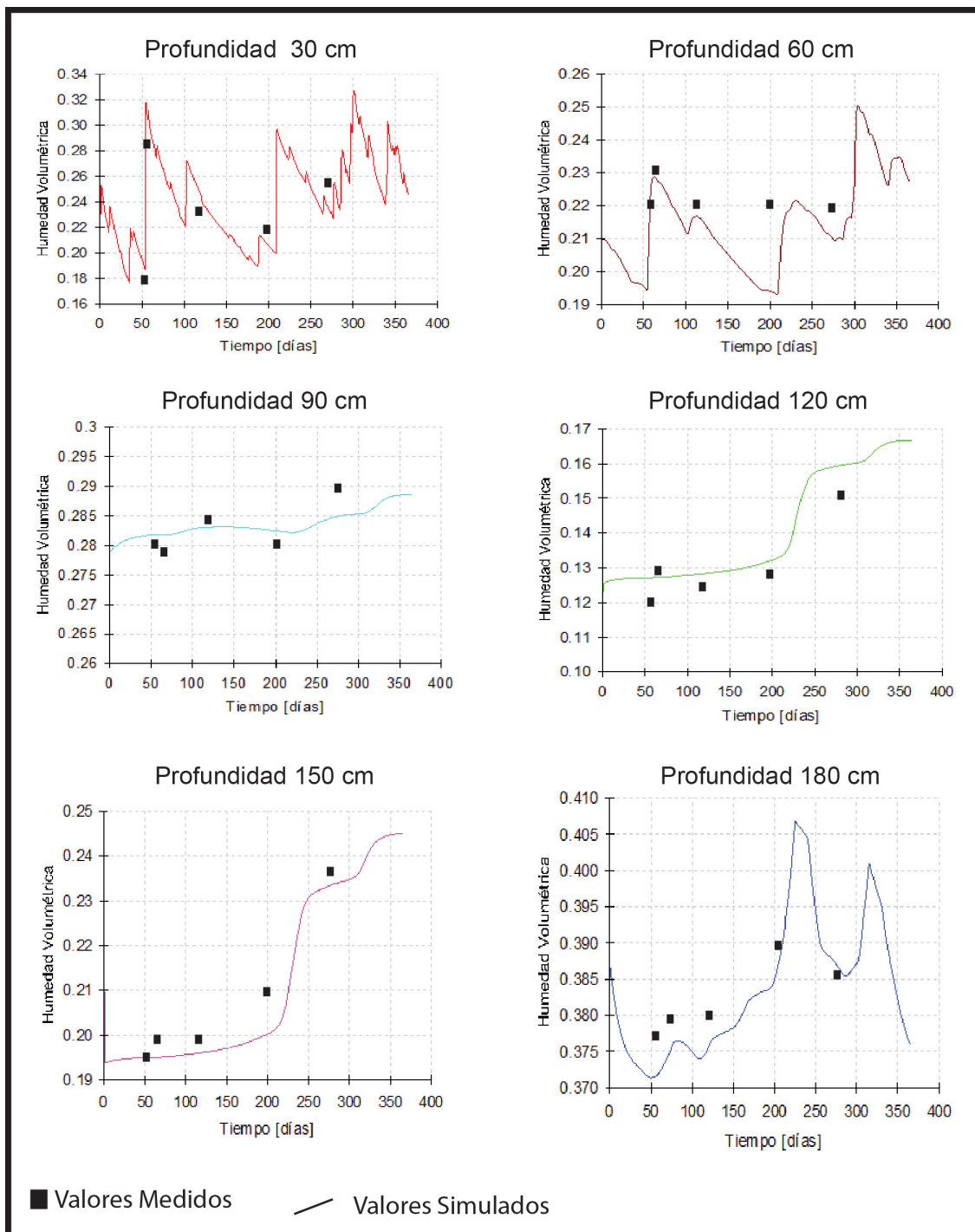


Figura 4: Simulación de los valores de humedad volumétrica observada para cada nodo de observación. Se indican los valores medidos en campo (Lafont, 2009).

A mayores profundidades, los nodos de 150 y 180cm de profundidad denotan la influencia del nivel freático, observándose que los niveles de humedad aumentan para el periodo de agosto-noviembre, momento en que la capa freática se encuentra más elevada, a profundidades de entre 1,80 y 1,90 m. Para $t=220$ días de simulación, se observa que el nivel freático alcanza el nodo de observación de 180 cm, registrando humedades de saturación. Esto es consistente con la precipitación ocurrida el 28/07/2006 de 49 mm, siendo a su vez para esa época los valores de $EVTP=0,58$ mm/día, los más bajos del año. Por su parte, para los meses de verano los valores de humedad descienden del mismo modo que lo hace la capa freática, predominando la

transferencia de humedad al suelo por ascenso capilar desde la napa freática. Efecto observado en la disminución de humedad progresiva en el material más profundo y paulatino aumento en los horizontes superiores, y validado por los perfiles de potencial hidráulico total registrados para tales fechas.

Potencial Hídrico

Analizando los datos registrados de potencial hidráulico total vs profundidad y los gráficos de salida de vectores de flujo para la sección se puede reconocer los estadios de movimiento de agua bajo efectos mátricos capilares (flujo ascendente) o efectos gravitatorios (flujo descendente). Realizado el análisis de este modo, la ZNS se considera como un todo en conjunto, compuesta por segmentos donde la humedad puede moverse hacia arriba y conformar EVT, o hacia abajo y sumarse a la recarga, según sean las condiciones de potencial hidrodinámico total a lo largo del perfil. Estos dominios son separados por planos de flujo cero, donde la humedad converge o diverge denominados PFCC o PFCD respectivamente.

Los meses de verano muestran una disposición predominante de flujo ascendente bajo efectos mátricos, observada por ejemplo en el perfil hidrodinámico total (PPHT) para la fecha 21/02/2006 (Fig. 5). Esta condición se relaciona a las bajas precipitaciones ocurridas para la época sumada a la alta demanda de humedad por la atmosfera.

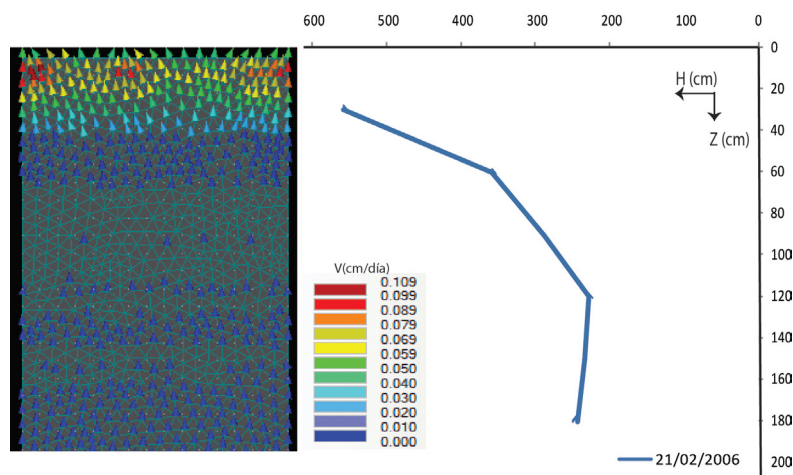


Figura 5: Dirección de flujo simulada para el día 52 (21/02/2006). Se observa el PPHT medido para la fecha por Lafont (2009).

La supremacía de movimientos ascendentes es inhibida cuando la componente gravitatoria del flujo ($\delta\psi_g/\delta z$) predomina sobre los gradientes mátricos ($-\delta\psi_m/\delta z$). De este modo, la entrada de agua al perfil debido a precipitaciones de gran escala queda registrada por un cambio en la disposición de los vectores, donde se tornan de manera descendente. Para el tiempo de simulación $t=350$ (Fig. 6) se observa claramente esta condición, influenciado por las precipitaciones ocurridas los días 07/12/2006, 13/12/2006 y 16/12/2006 de 24mm, 7mm y 8mm respectivamente. Para los niveles inferiores se continúa observando la transferencia de humedad de la capa freática

hacia la zona no saturada por ascenso capilar, efecto típico de los meses cálidos en la zona (Carrica *et al.* 2003).

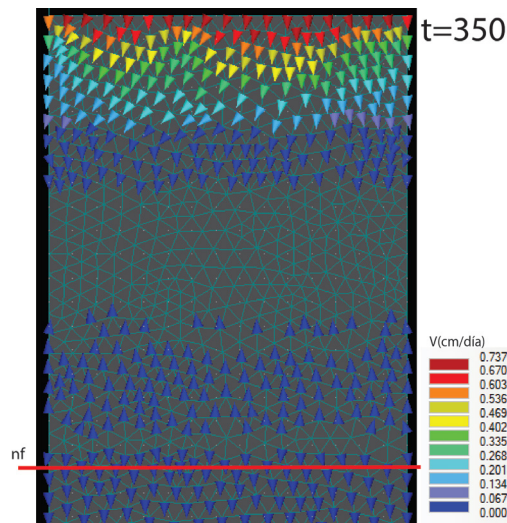


Figura 6: Dirección de flujo para el día 350 (16/12/2006).

Los meses de inviernos se caracterizan por presentar las menores tasas de EVTP (valores de 0,06mm/día a 0,11 mm/día) y por ser el periodo más secos, no obstante pueden registrarse precipitaciones aisladas como se observa para las fechas 28/07/2006 (49 mm) y 12/08/2006 (6,6 mm), que ante la escasa demanda de humedad por la atmosfera, el agua que infiltra mantiene grandes oportunidades de transformarse en recarga. Para el $t=225$ días de simulación (Fig. 7a) se denotan velocidades muy bajas de flujo características del momento del año, y un frente de humedad descendente para profundidades que no son afectadas por la extracción de agua por raíces. No obstante, las mayores tasas de recarga se registran para los meses de la primavera, evidenciado por el ascenso progresivo del nivel freático para dicho periodo. Para el tiempo de simulación $t=300$ (Fig. 7b), correspondiente al día 27/10/2006 se observa un gradiente descendente hasta profundidades de hasta 100 cm, efecto facilitado por las precipitaciones ocurridas los días 24/10/2006 y 27/10/2006 de 28 mm y 19 mm respectivamente.

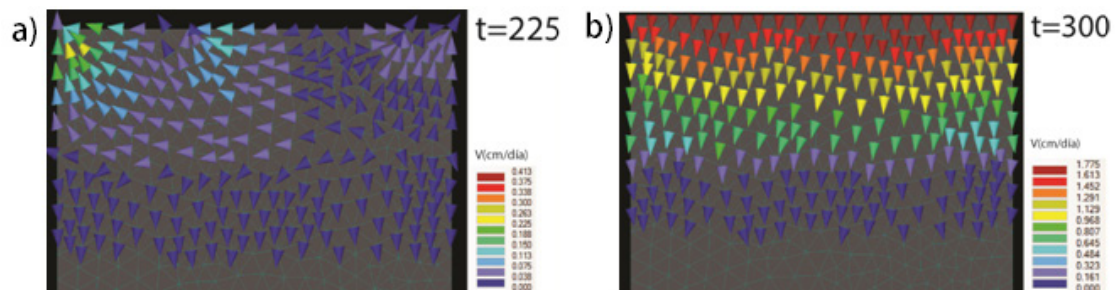


Figura 7: a) Dirección de flujo para el día 225 (13/08/2006). b) Dirección del flujo para el día 300 (27/10/2006).

Tensión Matricial

Los valores de tensión matricial simulados fueron analizados para cuatro fechas analizando los perfiles de h (cm) vs profundidad (Fig. 8) de datos medidos y simulados para el 01/03/2006 (verano), 27/04/2006 (otoño), 19/07/2006 (fin otoño-principio invierno) y 29/09/2006 (primavera).

Para el registro del día 01/03/2006, cabe destacar las precipitaciones acaecidas los días 23/02/2006 y 26/02/2006 de 72 y 9 mm respectivamente. Puede observarse que aunque las tendencias generales se respetan, se produce una sobreestimación de los valores simulados por el código Hydrus 2D/3D. El valor medido para el tensiómetro ubicado a 90cm de profundidad indica la saturación en una zona del perfil, que no se evidencia en la simulación. Cabe destacar la gran variabilidad espacial que presenta el potencial de presión en el terreno, efecto que no fue tenido en cuenta en el modelo, como así también el flujo por macroporosidad, el cual conduce la humedad hacia niveles inferiores a velocidades mucho mayores que por los poros capilares.

Aunque la sobreestimación en la simulación es observable en el resto de las fechas, los valores simulados y medidos siguen tendencias muy similares, para profundidades mayores a 100cm. Bajo estos resultados, puede apreciarse que el modelo podrá ser utilizado para la cuantificación de la franja capilar en estudios futuros.

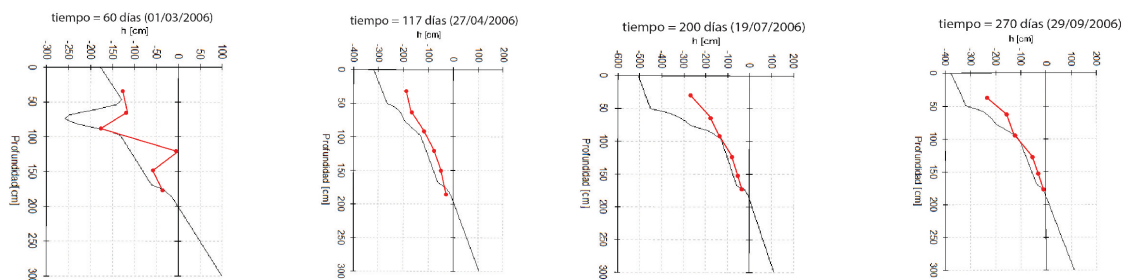


Figura 8: Gráficos presión matricial vs profundidad donde se indican los registros simulados y medidos por Lafont (2009).

Conclusión

El modelo propuesto para la hidrodinámica de la ZNS aplicando el código Hydrus 2D/3D permitió un ajuste aceptable entre los valores simulados y medidos en campo. Se logro dilucidar ciertos procesos hidrogeológicos, especialmente la relación entre periodos lluviosos y periodos secos, la preponderancia de flujos matriciales ascendentes (componente capilar) o descendentes (componente gravitacional) y la relación entre el contenido de humedad del suelo y el control que ejerce la posición de la capa freática, durante el transcurso de un año hidrológico calendario. De esto modo se logro validar la metodología a aplicar en futuros estudios a realizar en el mismo contexto hidrogeológico, concierne al transporte de solutos, en especial sustancias potencialmente contaminantes. Los parámetros hidráulicos obtenidos en este estudio, servirán como referencia inicial para simulaciones futuras y podrán ser optimizados

con nuevos datos a obtenerse durante el periodo 2017-2018 tras el reacondicionamiento de la parcela experimental.

Referencias

Campo de Ferreras, A., A. Capelli de Steffens, y P. Diez, 2004. El clima del suroeste bonaerense. Departamento de Geografía y Turismo. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. Argentina, 105 pp.

Capelli de Steffens, A. M. y A. M. Campo de Ferreras, 2004. Climatología, en: Ecosistema del estuario de Bahía Blanca. Piccolo, M. C. y M. S. Hoffmeyer (eds.). Instituto Argentino de Oceanografía, Bahía Blanca, Argentina. 79-88p.

Carrica J. C., R. E. Albouy y A. G. Bonorino, 2003. Modificaciones hidrodinámicas en el acuífero costero del área industrial de bahía blanca. III Congreso Argentino de Hidrogeología, Rosario, Septiembre del 2003. PP

Carrica J.C. y C. Lexow, 2006. Subsistencia en el área costera de Bahía Blanca, Argentina. VIII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Asunción. Paraguay. En CD. PP

Carrica, J., C. Lexow, y R. E. Albouy, 2008. Análisis de la recarga en un suelo con relleno artificial. IX Congreso de Hidrogeología Subterránea. Quito. PP

Fidalgo, F., 1983. Geología y Geomorfología del área de White-Cerri y los alrededores de bahía blanca. Comisión Estudio de Suelos White-Cerri. MOP de la provincia de buenos Aires. PP

Fidalgo F., F. de Francesco y R. Pascual, 1975. Geología superficial de la llanura bonaerense. VI Congreso Geológico Argentino. Bahía Blanca. Relatorio: 103-138.

Lafont, D., 2009. Identificación y caracterización de contaminantes metálicos en el acuífero costero del área industrial de Bahía Blanca. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur. PP

Lexow, C., 2010. Distribución del agua en un suelo Hapludol: manejo del código Hydrus 2D/3D en la modelación del flujo no saturado. I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul, Buenos Aires, Argentina – 21 al 24/09/2010.

Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, 12(3), 513-522,.

Simunek, J., M. Sejna, y M. Th. Van Genuchten, 2006. The HYDRUS (2D/3D) software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat and

multiple solutes in variably saturated media. Version 1.0. PC Progress, Prague, Czech Republic.

Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44(3):892-898.

Van Genuchten, M.Th., F.J. Leij. y S.R. Yates, 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils.